中国科学: 地球科学 2015 年 第 45 卷 第 10 期: 1553 ~ 1568
www.scichina.com earth.scichina.com



论 文

磁暴期间环电流离子增长与磁尾离子注入的因果时序探测研究

路立[①*], S MCKENNA-LAWLOR[②], 曹晋滨[③], K KUDELA[④], J BALAZ[②④]

① 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190;
② Space Technology Ireland, National University of Ireland, Maynooth, Co. Kildare IE4799569F, Ireland;
③ 北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191;
④ Institute of Experimental Physics, Kosice SK-04001, Slovakia
* E-mail: luli@nssc.ac.cn

收稿日期: 2014-12-02; 接受日期: 2015-03-24; 网络版发表日期: 2015-09-16
国家自然科学基金项目(批准号: 41431071, 41574152)、国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2011CB811404)、中国科学院空间科学战略性先导科技专项(编号: XDA04060204)、VEGA 基金项目(编号: 2/0040/13, 2/0059/13)和爱尔兰企业界资助

摘要 TC-2 卫星上的中性原子成像仪(NUADU)在 2005 年 5 月 15 日磁暴期间(并伴随有系列亚暴事件)记录了反映环电流离子连续变化的能量中性原子(ENA)图像探测数据. 比较由中性原子图像反演的 4 min 时间分辨的环电流离子空间分布与地球同步轨道 LANL 系列卫星(环绕赤道面~6.6 R_E)上同步轨道粒子分析仪(LANL-SOPA)原位离子通量探测数据, 以及相同高度的同步系列卫星 GOES 的磁场数据, 发现环电流区离子通量增长发生在磁力线尾向拉伸的亚暴增长相阶段, 而不是发生在磁场偶极化之后. 这一发现挑战了以往的环电流离子注入是磁场偶极化时由磁尾直接注入的概念, 但仍需更多的观测实例进一步认证.

关键词
能量中性原子
环电流
能量粒子
能量离子注入

典型的地磁暴是由增强的太阳风和行星际磁场南向驱动的地磁空间响应. 磁暴期间太阳风把能量输入磁层引起环电流增强(Tsurutani 和 Gonzalez, 1997). 环电流(ring current)主要是由赤道区, 2~7 R_E 范围内的能量离子和电子在磁场梯度下沿地磁经度方向的漂移所形成的. 观测表明, 磁暴期间环电流增强主要是在L=~4(C:son Brandt等, 2002a; Lu等, 2008), 由Dst(或SYM-H)指数量度.

以往的研究表明环电流离子来源于太阳风和电离层, 经过在磁尾加速后最终注入内磁层(Sergeev等, 1998; Kamide等, 1998; Liu和Rostoker, 1995; Daglis等, 1999). 只有少数太阳风离子可以从极盖区直接进入环电流(Peroomian和Ashour-Abdalla, 1996). 环电流离子通常是由行星际南向磁场驱动的对流电场从磁尾注入(Wygant等, 1998; Hori等, 2005; Xie等, 2006), 以及/或亚暴磁场偶极化过程产生的感应电场从磁尾注入(Delcourt, 2002).

亚暴偶极化感应电场把粒子从内等离子体片区注入到地球同步高度(L>4). 多数由对流电场从内等离子体片区注入的能量离子沿一条开放的漂移路径

中文引用格式: 路立, McKenna-Lawlor S, 曹晋滨, Kudela K, Balaz J. 2015. 磁暴期间环电流离子增长与磁尾离子注入的因果时序探测研究. 中国科学: 地球科学, 45: 1553–1568
英文引用格式: Lu L, McKenna-Lawlor S, Cao J B, Kudela K, Balaz J. 2015. The causal sequence investigation of the ring current ion-flux increasing and the magnetotail ion injection during a major storm. Science China: Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-015-5121-7

从磁尾到磁层顶(Xie等, 2006), 它们只对部分环电流有贡献(Le等, 2004). 环电流粒子的源和注入途径一直是困惑空间物理学者的关键问题.

中性原子成像探测可以监测环电流区的等离子体空间变化, 它与同步高度卫星的原位离子探测相配合, 可以帮助我们追踪磁暴期间的亚暴注入粒子去向. C:son Brandt等(2002a, 2002b)曾利用IMAGE卫星上的HENA数据分析了磁暴期间系列亚暴对应的环电流离子注入事件; 用夜侧L>8, 或L>9, 中性原子探测数据解释同步高度附近探测到的离子注入和亚暴增长相期间观测到的夜侧, L=~9附近, 离子通量减少现象. 在这些发表的探测结果里, 我们发现亚暴增长相期间夜侧近地(L=~4)环电流区中性原子通量增加(C:son Brandt等, 2002b), 而且夜侧近地环电流区的中性原子辐射通量增加先于同步高度的离子注入事件(C:son Brandt等, 2002a).

本项研究基于2005年5月15日磁暴期间, 双星(TC-2)上中性原子成像仪(McKenna-Lawlor等, 2004; Liu等, 2005)获取的高时空分辨探测数据和反演结果仔细分析了磁暴期间系列亚暴不同阶段环电流的增长和衰减过程.

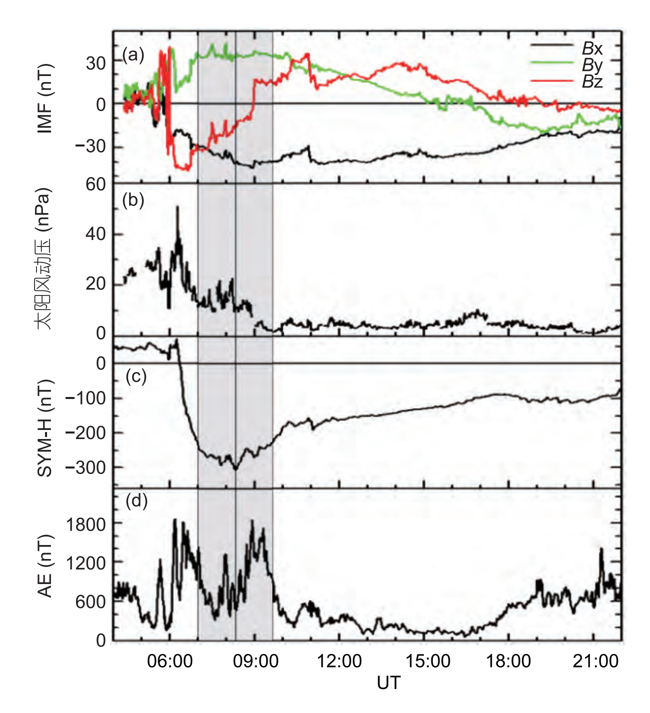


图 1　2005 年 5 月 15 日磁暴期间的行星际磁场(a)、太阳风动压(b)、SYM-H 指数(c)和 AE 指数(d)

灰色阴影时段, 0700~0944 UT, 标注为双星中性原子成像仪(NUADU/TC2)有 ENA 探测图像记录, 三条竖线把阴影区分成两个子区间正好分隔磁暴的主相和恢复相

1　2005 年 5 月 15 日磁暴期间的中性原子成像探测数据

图1显示2005年5月15日, 行星际磁场南向(图1(a)中的黑线), 并伴随有强太阳风动压(图1(b)), 约0600 UT, 我们看到强磁暴的急始(图1(c)), 该磁暴包含有两个AE=~1800 nT的亚暴(图1(d)), 分别发生在0608和0822 UT(Tverskaya等, 2007). 依据图1(d)的AE指数分布, 我们发现还有一个AE=~1400 nT的亚暴触发于0736 UT. 磁暴的主相结束于SYM-H=−305 nT, 约在0820 UT, 并且紧跟着最后一个亚暴(0822 UT)的开始.

2005年5月15日的磁暴是一个超强磁暴, 依据磁强计在极光和亚极光区对磁暴急始的记录, 它不同于典型极光亚暴的开始. 这个超大磁暴展示了复杂的时间演化过程(Lazutin和Kuznetsov, 2008)和重要的空间天气效应. 最初的扰动产生于一对相继发生的太阳耀斑. 第一个急始产生在0230 UT, 后跟随着多变的太阳风结构; 第二次冲击约在0600 UT到达地球, 0615 UT, 行星际磁场南向, 并开始了一个强地磁扰动事件. 很多人都讨论过这个超强磁暴(例如, Kozyreva和Kleimenova, 2007). Echer等(2008)曾仔细研究了在这之前的强磁暴特性.

中性原子成像探测可以用于监测全球环电流的演化. 以往的中性原子成像探测和反演(如HENA/IMAGE)需要较长的积分时间, 一般大于10 min (C:son Brandt等, 2002b; Lu等, 2010), 这样就可能会模糊离子注入和环电流离子增长的因果时序. 我们有幸用双星上具有高时空分辨能力的中性原子成像仪所记录的数据分析这一磁暴过程.

中性原子成像仪(NUADU)具有全空间4π立体角覆盖能力, 空间分辨为11.5°×2.5°. TC-2卫星位于辐射带外远地点附近, NUADU的50~81和61~158 keV能道在磁暴期间记录了约2.7 h(0700~0944 UT), 见图1的灰色阴影区域. 这些中性原子成像探测数据经过噪声清理(McKenna-Lawlor等, 2010), 按4 min时长进行积分得到共40幅ENA图像. 把40幅ENA图像分成两组, 在图1中用3条竖线隔成2个子区间, 每组20幅

ENA图像, 分别对应系列亚暴中的两个亚暴(0736和0822 UT), 用图2(a)和(b), 以及图3(a)和(b)展示. 中性原子通量有2个峰值, 分别在2个子区间内, 0745和0847 UT. 我们注意到图1中前一个子区间(0700~0822 UT)位于磁暴的主相, 而后一个(0822~0944 UT)位于磁暴的恢复相.

2　由中性原子成像探测数据反演得到的全球离子通量分布

我们为双星上的NUADU开发的线性约束反演方法(Lu等, 2010)可以用于较短时间积分的中性原子探测图像的反演. 图2和3中经过清理后的中性原子4 min积分图像在中性原子辐射敏感区域尚有几百个探测计数, 这已经满足数据反演的统计需求.

我们依次把图2和3中, 50~81和81~158 keV两个能道, 两个时段的中性原子积分图像通过反演, 用图4(a)和(b), 及图5(a)和(b)展示出其对应的全球离子分布及演化过程.

图4(a)和(b)给出50~81 keV能道的全球离子分布的时变过程: 离子通量最初在夜侧增强, 然后西向发展, 最后在昏侧减弱消散. 81~158 keV能道(图5(a)和(b)), 对应两个亚暴, 表现出两段类似的演化过程: 离子通量增强区先是出现在偏昏侧(0720和0822 UT), 然后东向扩展, 并在夜侧达到极大; 极大之后, 增强区又向西发展, 最后在昏侧减弱消散. 在上述变化过程中离子通量增大的区域主要出现在午夜到黄昏的扇区内, 并有两次峰值, 分别出现在0745和0847 UT.

3　中性原子成像探测及反演结果与其他卫星探测数据的综合比较分析

3.1　与同步高度 LANL/SOPA 离子通量原位探测数据的对比分析

LANL(Los Alamos National Laboratory)系列卫星(Belian等, 1992)运行在地球同步高度(~6.6 R_E)不同地方时的外辐射带空间环境中. 我们把中性原子成像仪探测数据的反演结果按照LANL/SOPA原位探测的时间和空间位置叠加在离子探测图上(图6). 把中性原子成像探测数据的反演结果与LANL/SOPA相近能道的原位离子探测数据相比较可以看出在夜侧(图6(a))、昏侧(图6(b))和晨侧(图6(d))两者基本一致. 由于磁暴期间磁层顶向阳面被压到同步高度以内, 所以使用偶极磁场模型的反演结果(Lu等, 2010)在午侧(图6(c))与原位探测的差别较大.

磁暴期间磁力线和磁壳L值将被尾向拉伸(Lu等, 2010), 离地球越远由这种拉伸引起的变形越大. 因此, 图6中, 由偶极磁场模型反演的离子通量会略低于原位探测数据. 然而磁场在≤4 R_E附近变化不大(McKenna-Lawlor等, 2010), 图6表明反演结果小于、并接近同步高度(L=~6.6)的原位探测结果, 这使得我们对图4和5在L=~4附近的中性原子成像数据反演结果的可信程度更有信心.

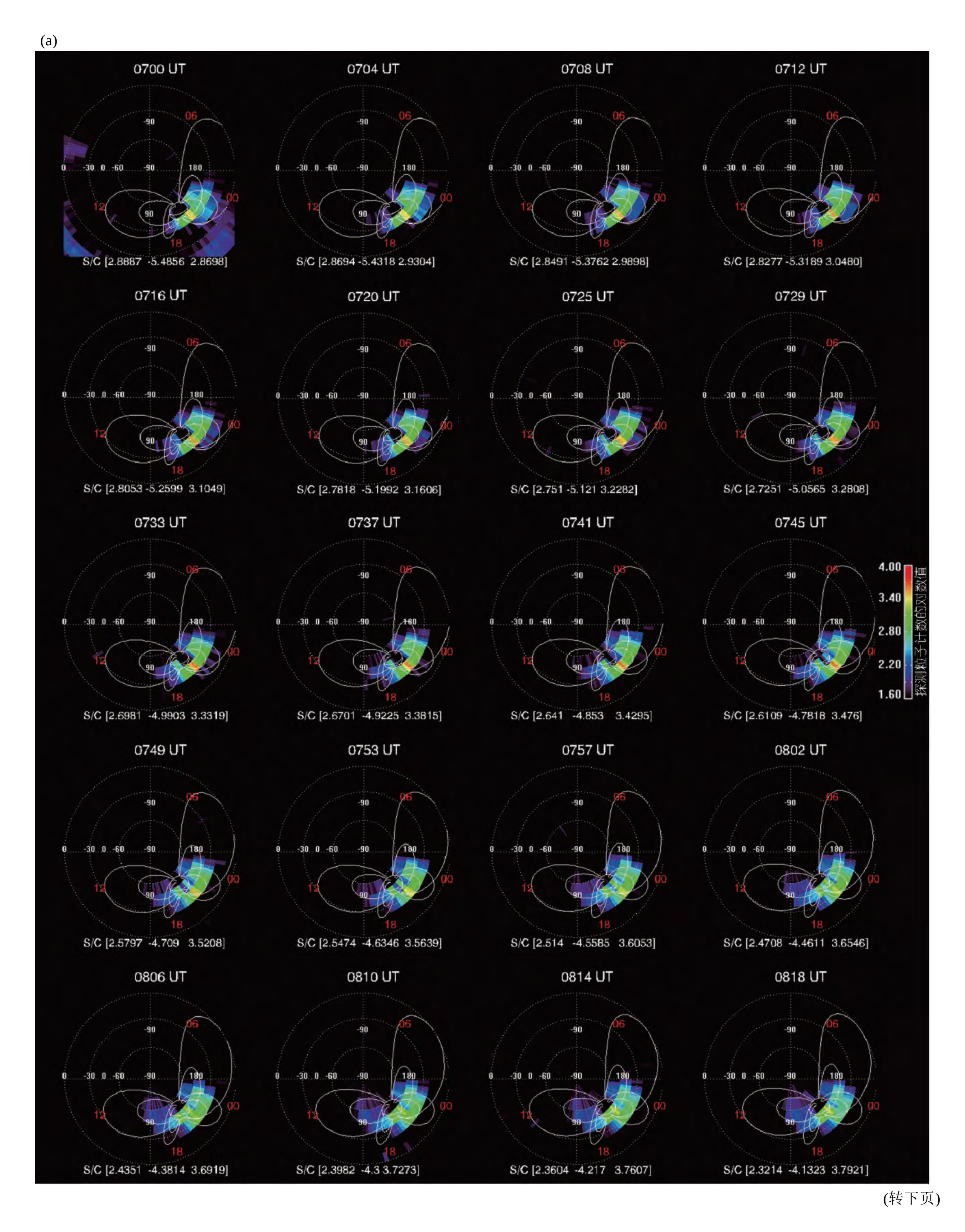
将4 min时间分辨的离子通量反演结果与原位侧数据的比较使得描述环电流的演化时序更具有实际意义. 图6中环电流两次增长过程分别发生在7:20–7:45和8:22–8:47时段. 通过比较发现原位探测的离子注入事件, 即离子通量突然剧增现象, 在晨侧发生于环电流开始增长之前(图6(d)); 在昏侧离子注入事件几乎与环电流增长同时发生(图6(b)), 然而, 在夜侧观测到的离子注入事件却明显滞后于环电流的增长(图6(a)), 即便是忽略环电流离子从电荷交换形成中性原子到被中性原子成像仪捕获的时间延迟, 上述探测结果从因果时序上也还是不支持环电流离子是从磁尾内等离子体片中直接注入的传统概念.

3.2　环电流区中性原子辐射通量的地磁活动指数响应

SYM-H(或Dst)指数是环电流的量度, 更有趣的是环电流的变化与磁暴期间表征系列亚暴的AU/AL指数也有某种相关性. 我们用反演结果(图4和5)的离子通量极大值和平均值表征环电流的演化过程, 并把它们与地磁指数描绘在同一时间轴上(图7). 由于图4和5只有4 min的时间分辨, 所以我们增加了中性原子成像仪原始探测数据中的ENA通量极大值(图7(d)), 作为环电流演化的参照.

Grafe和Feldstein(2000)通过统计研究表明极光电激流(用AL指数量度)与环电流强度之间没有明显的统计相关性. 但图7表明两个环电流离子通量峰值(图7中的红色竖虚线)刚好是两个连续亚暴增长相与膨胀相的分界, 即两次亚暴的膨胀相都是在环电流

(a)


0700 UT
S/C [2.8887 -5.4856 2.8698]
0704 UT
S/C [2.8694 -5.4318 2.9304]
0708 UT
S/C [2.8491 -5.3762 2.9898]
0712 UT
S/C [2.8277 -5.3189 3.0480]
0716 UT
S/C [2.8053 -5.2599 3.1049]
0720 UT
S/C [2.7818 -5.1992 3.1606]
0725 UT
S/C [2.751 -5.121 3.2282]
0729 UT
S/C [2.7251 -5.0565 3.2808]
0733 UT
S/C [2.6981 -4.9903 3.3319]
0737 UT
S/C [2.6701 -4.9225 3.3815]
0741 UT
S/C [2.641 -4.853 3.4295]
0745 UT
S/C [2.6109 -4.7818 3.476]
0749 UT
S/C [2.5797 -4.709 3.5208]
0753 UT
S/C [2.5474 -4.6346 3.5639]
0757 UT
S/C [2.514 -4.5585 3.6053]
0802 UT
S/C [2.4708 -4.4611 3.6546]
0806 UT
S/C [2.4351 -4.3814 3.6919]
0810 UT
S/C [2.3982 -4.3 3.7273]
0814 UT
S/C [2.3604 -4.217 3.7607]
0818 UT
S/C [2.3214 -4.1323 3.7921]
4.00
3.40
2.80
2.20
1.60
探测粒子计数的对数值

(转下页)

(接上页)

(b)

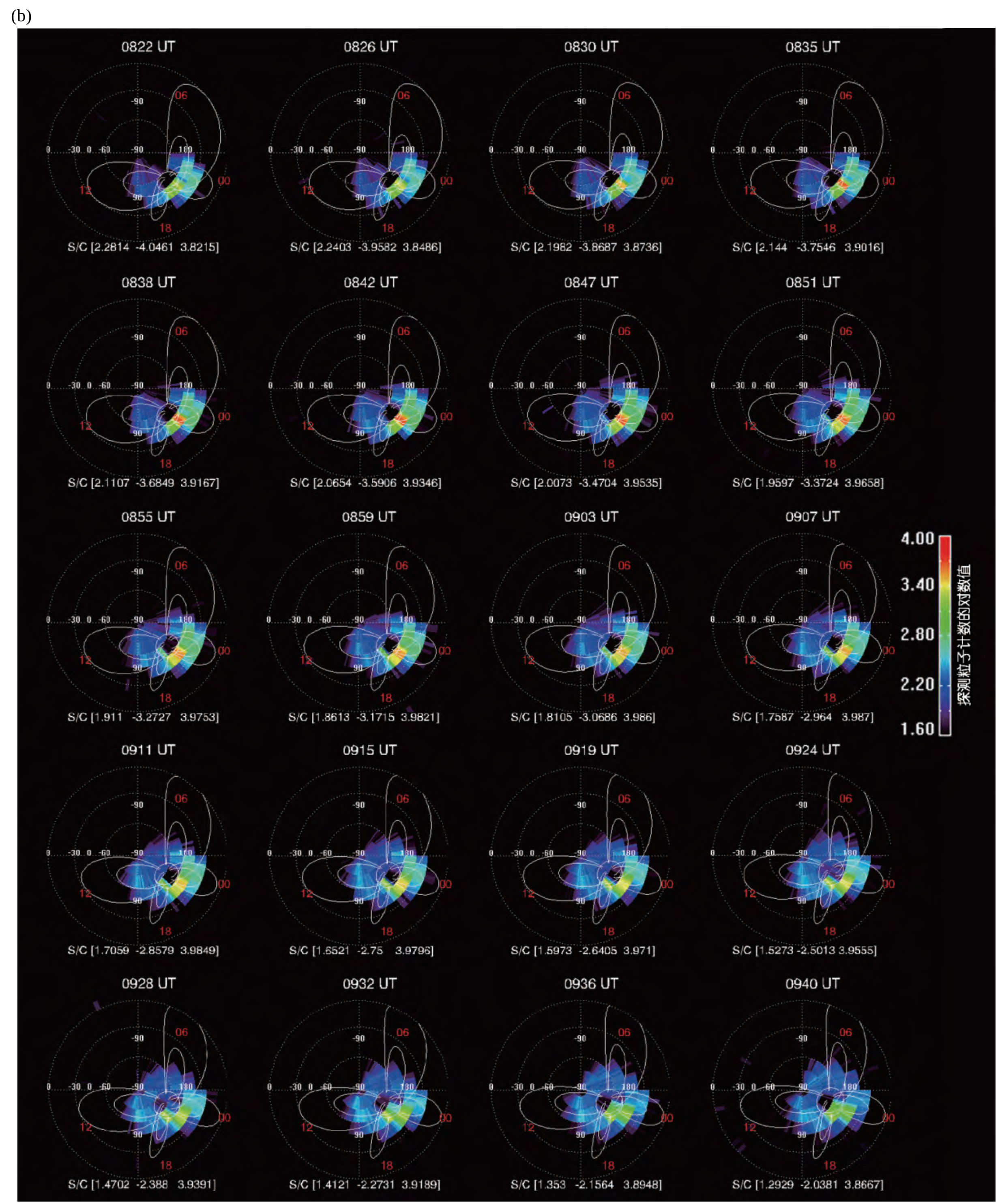
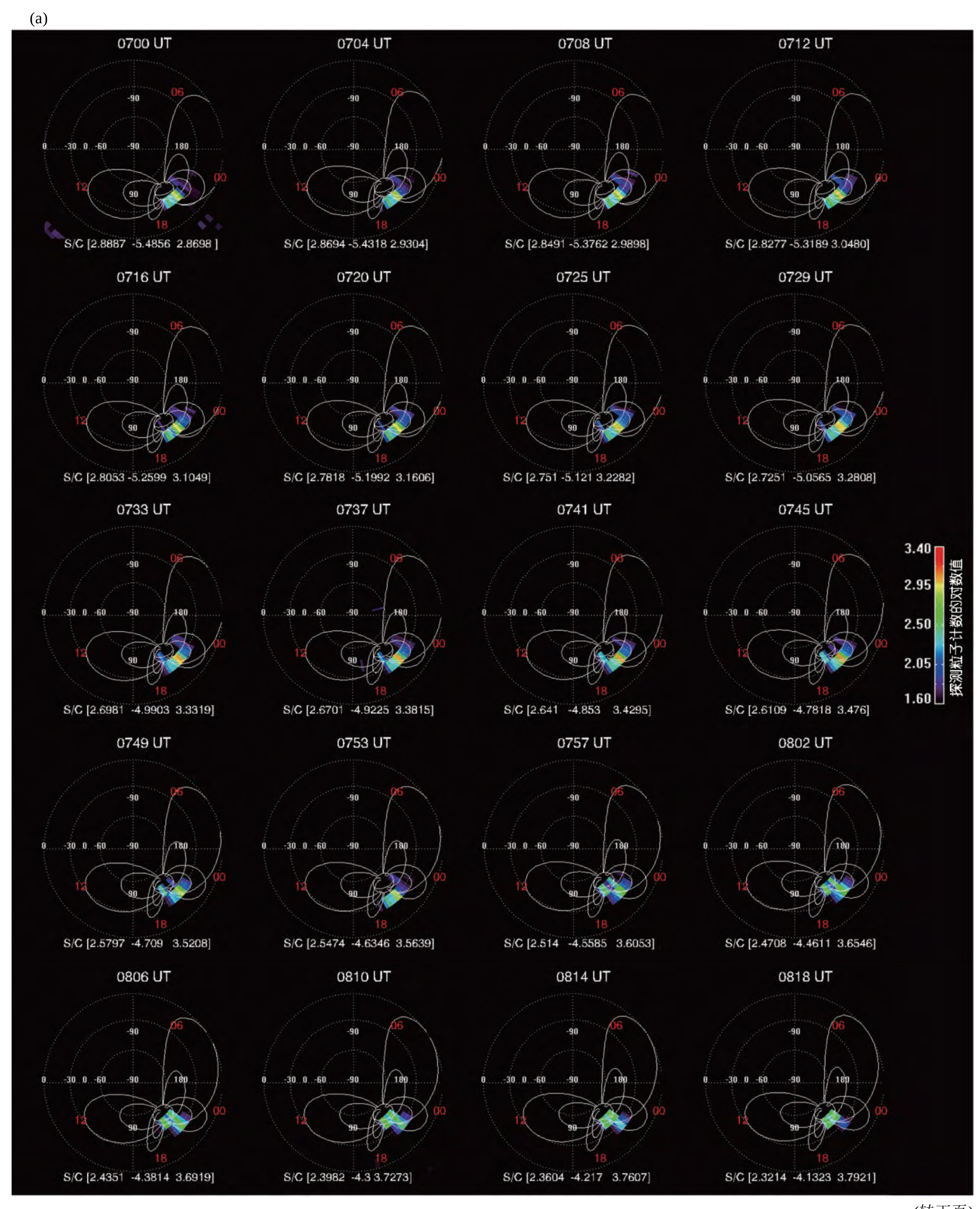


图 2　2005 年 5 月 15 日磁暴期间双星中性原子成像仪 50~81 keV 能道记录的 4 min 积分 ENA 探测图像的时间演化序列

(a) 0700~0822 UT; (b) 0822~0944 UT. 每幅 ENA 图像中, 仰角用圆形虚线标注, 方位角用虚直线标注. 白色曲线表示磁壳中 L=4, 8 的磁力线在 ENA 探测图上的投影, 对应的地方时标注为红色. 右侧采标表示探测粒子计数的对数值. ENA 图像的采集时间标注在图的上方; 采集图像的卫星位置标注在图的下方

(a)


0700 UT
S/C [2.8887 -5.4856 2.8698]
0704 UT
S/C [2.8694 -5.4318 2.9304]
0708 UT
S/C [2.8491 -5.3762 2.9898]
0712 UT
S/C [2.8277 -5.3189 3.0480]
0716 UT
S/C [2.8053 -5.2599 3.1049]
0720 UT
S/C [2.7818 -5.1992 3.1606]
0725 UT
S/C [2.751 -5.121 3.2282]
0729 UT
S/C [2.7251 -5.0565 3.2808]
0733 UT
S/C [2.6981 -4.9903 3.3319]
0737 UT
S/C [2.6701 -4.9225 3.3815]
0741 UT
S/C [2.641 -4.853 3.4295]
0745 UT
S/C [2.6109 -4.7818 3.476]
0749 UT
S/C [2.5797 -4.709 3.5208]
0753 UT
S/C [2.5474 -4.6346 3.5639]
0757 UT
S/C [2.514 -4.5585 3.6053]
0802 UT
S/C [2.4708 -4.4611 3.6546]
0806 UT
S/C [2.4351 -4.3814 3.6919]
0810 UT
S/C [2.3982 -4.3 3.7273]
0814 UT
S/C [2.3604 -4.217 3.7607]
0818 UT
S/C [2.3214 -4.1323 3.7921]
3.40
2.95
2.50
2.05
1.60
探测粒子计数的对数值

(转下页)

(接上页)

(b)

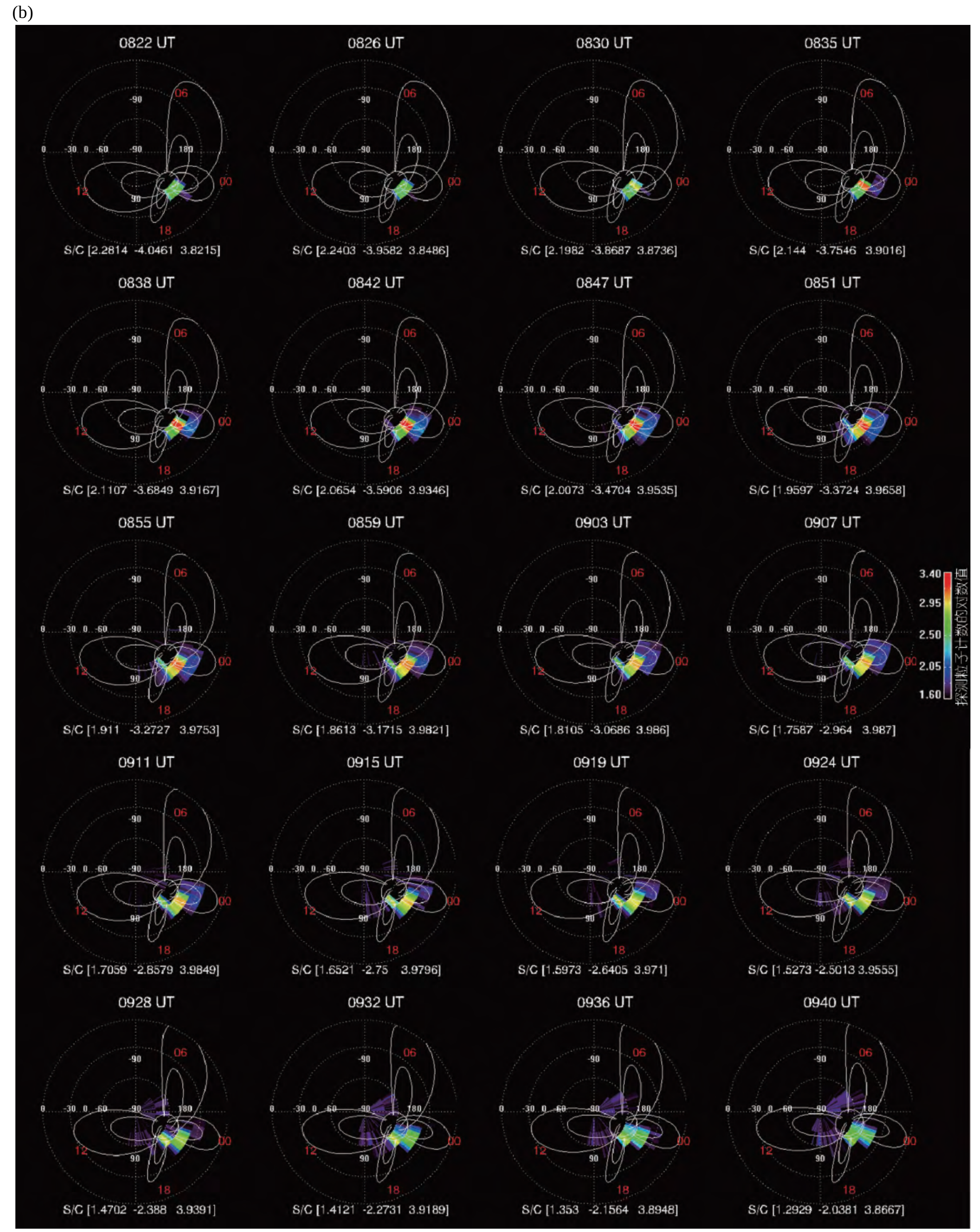
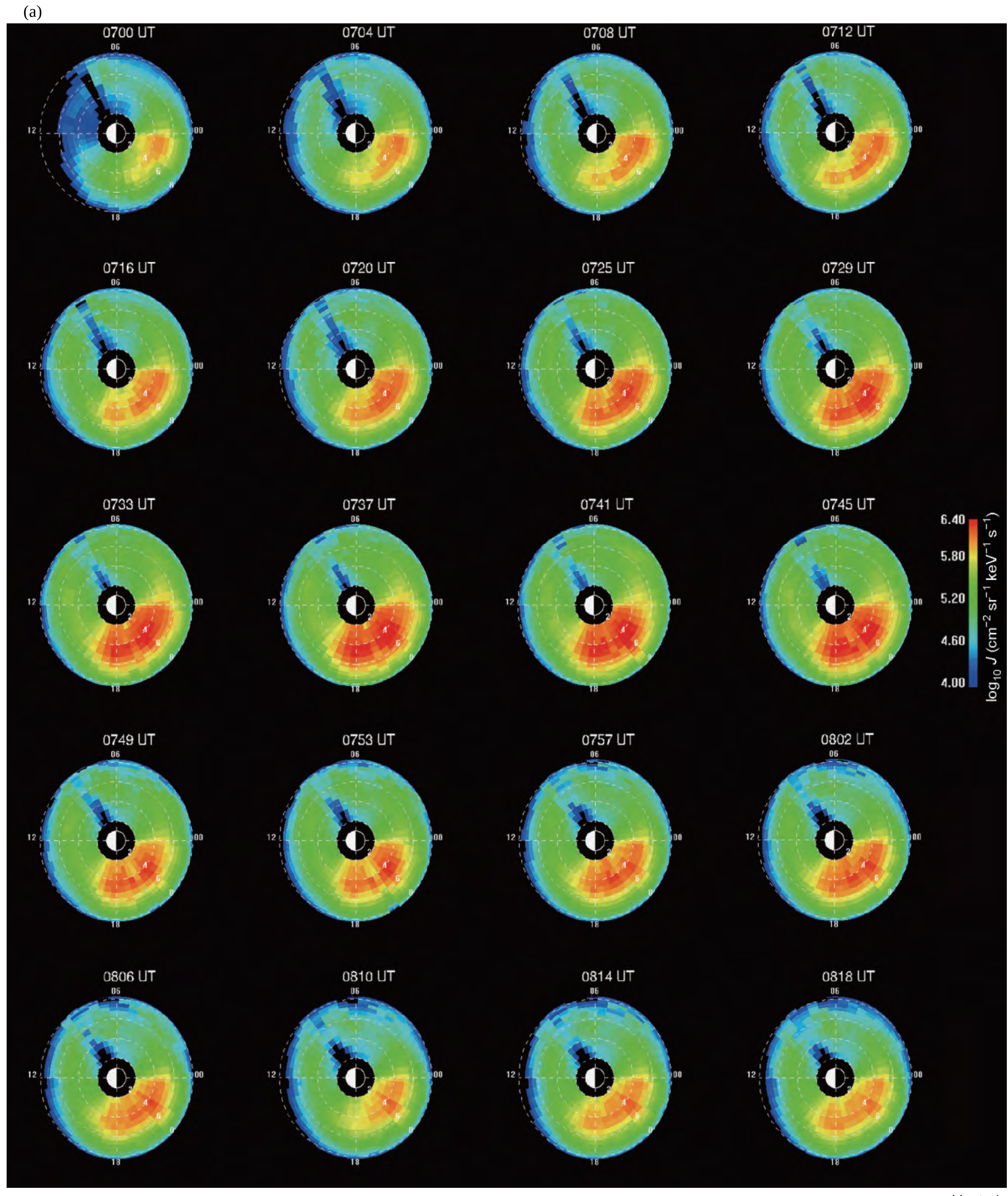


图 3　2005 年 5 月 15 日磁暴期间双星中性原子成像仪 81~158 keV 能道记录的 4 min 积分 ENA 探测图像的时间演化序列

(a) 0700~0822 UT; (b) 0822~0944 UT. 每幅 ENA 图像中, 仰角用圆形虚线标注, 方位角用虚直线标注. 白色曲线表示磁壳中 L=4, 8 的磁力线在 ENA 探测图上的投影, 对应的地方时标注为红色. 右侧采标表示探测粒子计数的对数值. ENA 图像的采集时间标注在图的上方; 采集图像的卫星位置标注在图的下方

(a)


0700 UT
0704 UT
0708 UT
0712 UT
0716 UT
0720 UT
0725 UT
0729 UT
0733 UT
0737 UT
0741 UT
0745 UT
0749 UT
0753 UT
0757 UT
0802 UT
0806 UT
0810 UT
0814 UT
0818 UT
06
12
00
18
6.40
5.80
5.20
4.60
4.00
$\log_{10} J$ (cm^{-2} sr^{-1} keV^{-1} s^{-1})

(转下页)

(接上页)

(b)

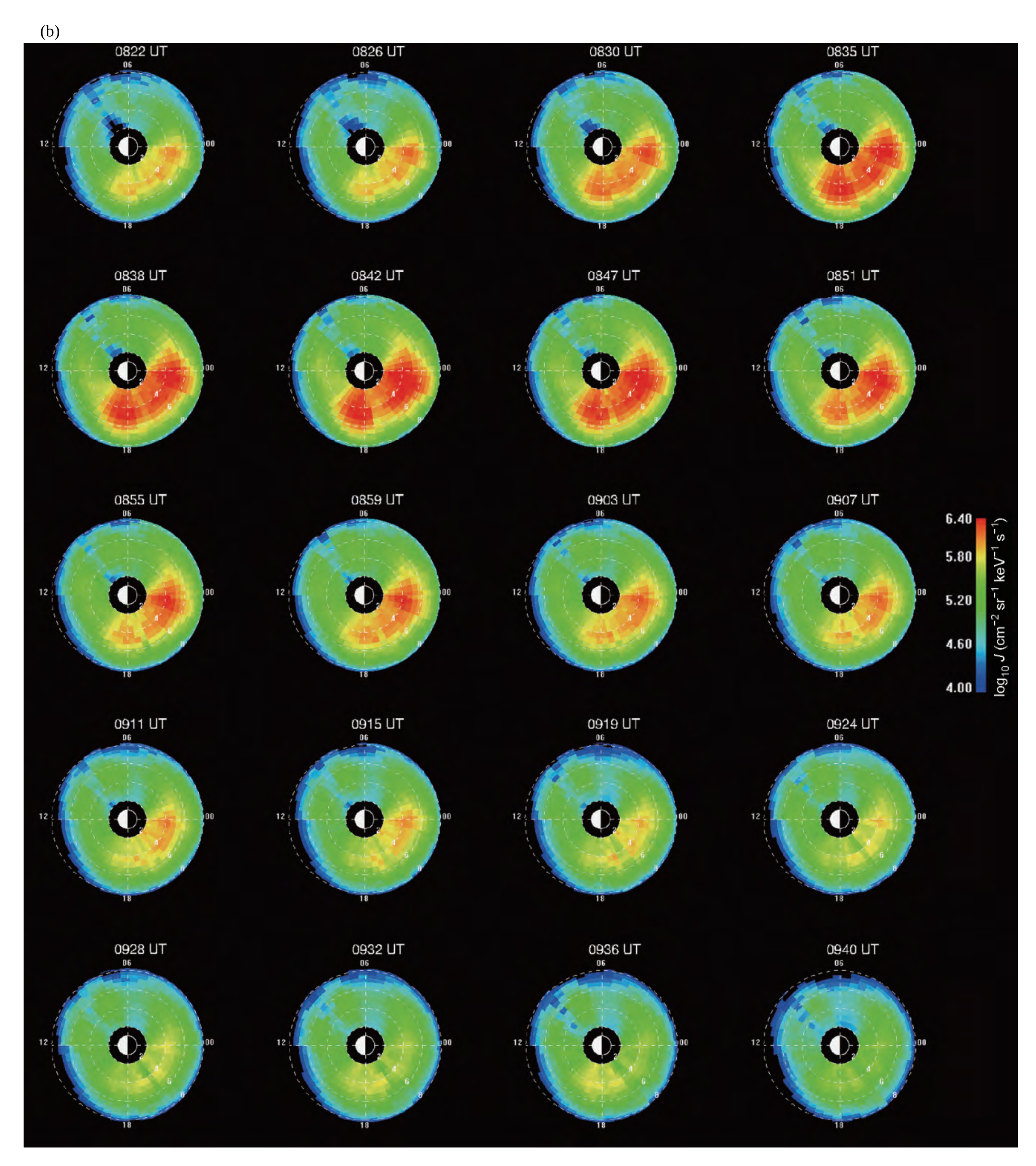
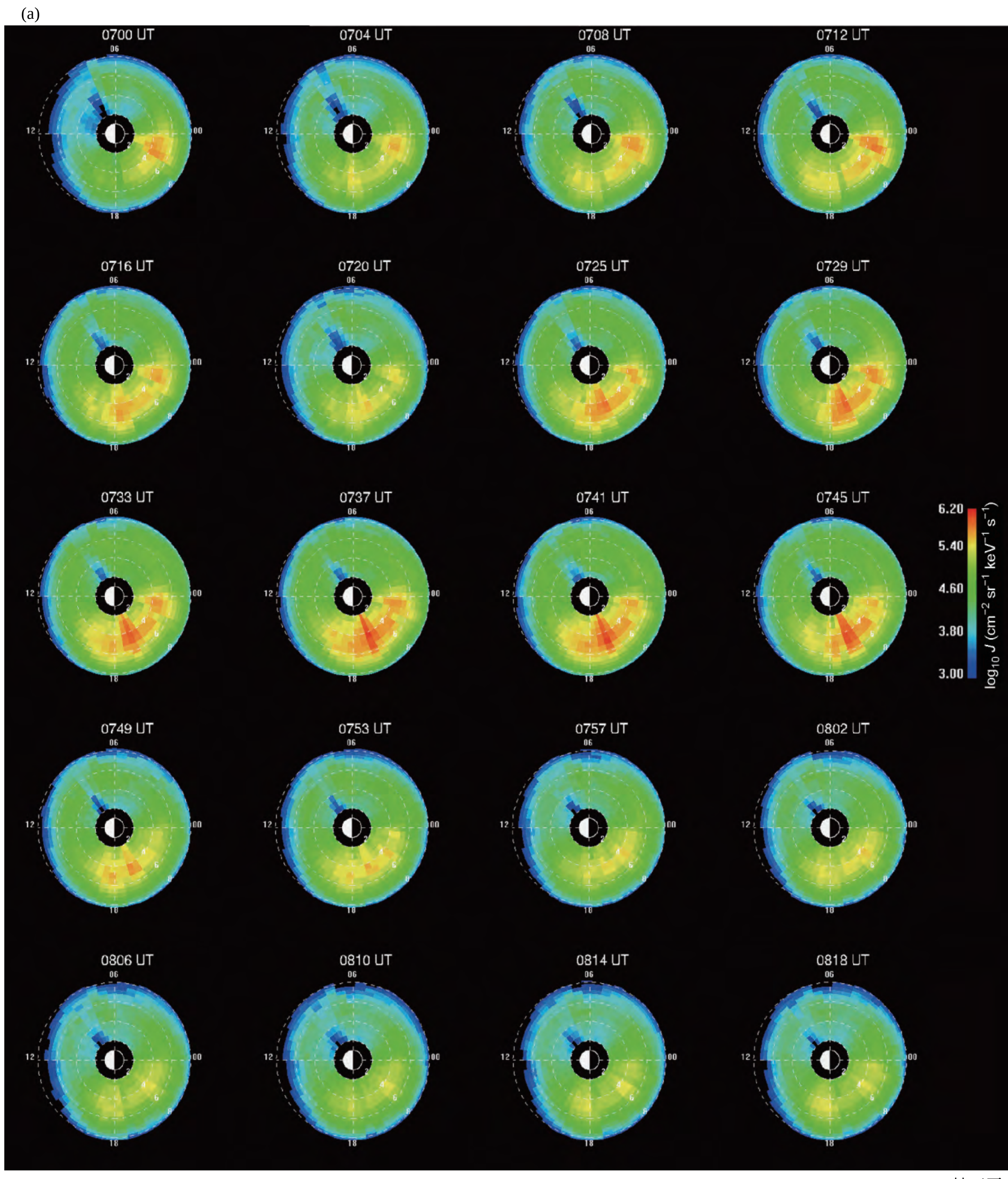


图 4　2005 年 5 月 15 日, 50~81 keV 能道, 反演的赤道区离子通量分布的时序演化过程

(a) 0700~0822 UT 时段; (b) 0822~0944 UT 时段. 用 L-MLT 极坐标表示, 通量大小的对数用右侧色标表示

(a)


0700 UT
0704 UT
0708 UT
0712 UT
0716 UT
0720 UT
0725 UT
0729 UT
0733 UT
0737 UT
0741 UT
0745 UT
0749 UT
0753 UT
0757 UT
0802 UT
0806 UT
0810 UT
0814 UT
0818 UT
06
12
00
18
6.20
5.40
4.60
3.80
3.00
$\log_{10} J$ (cm^{-2} sr^{-1} keV^{-1} s^{-1})

(转下页)

(接上页)

(b)

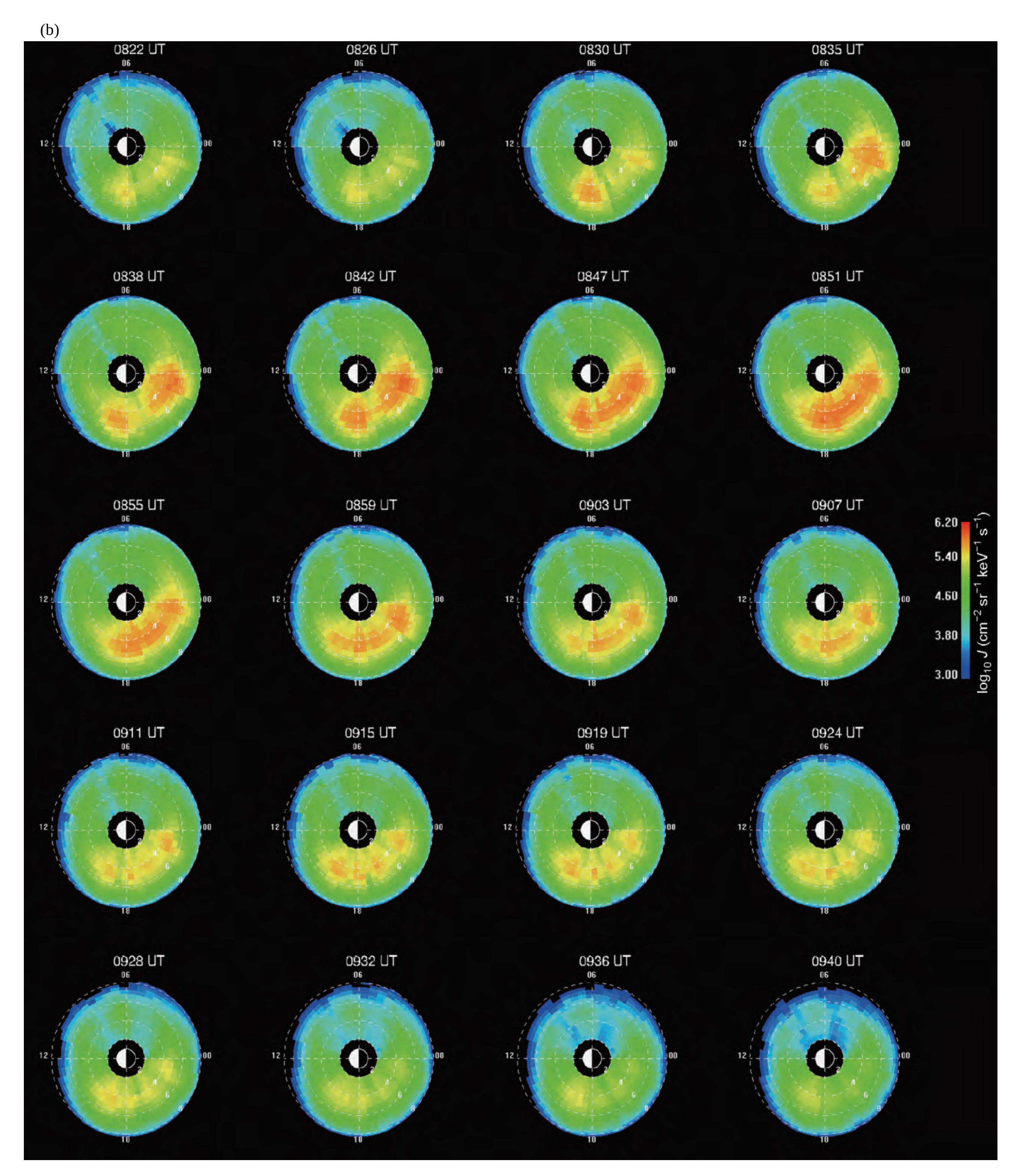


图 5　50~81 keV 能道, 反演的赤道区离子通量分布的时序演化过程

(a) 0700~0822 UT 时段; (b) 0822~0944 UT 时段. 用 L-MLT 极坐标表示, 通量大小的对数用右侧色标表示

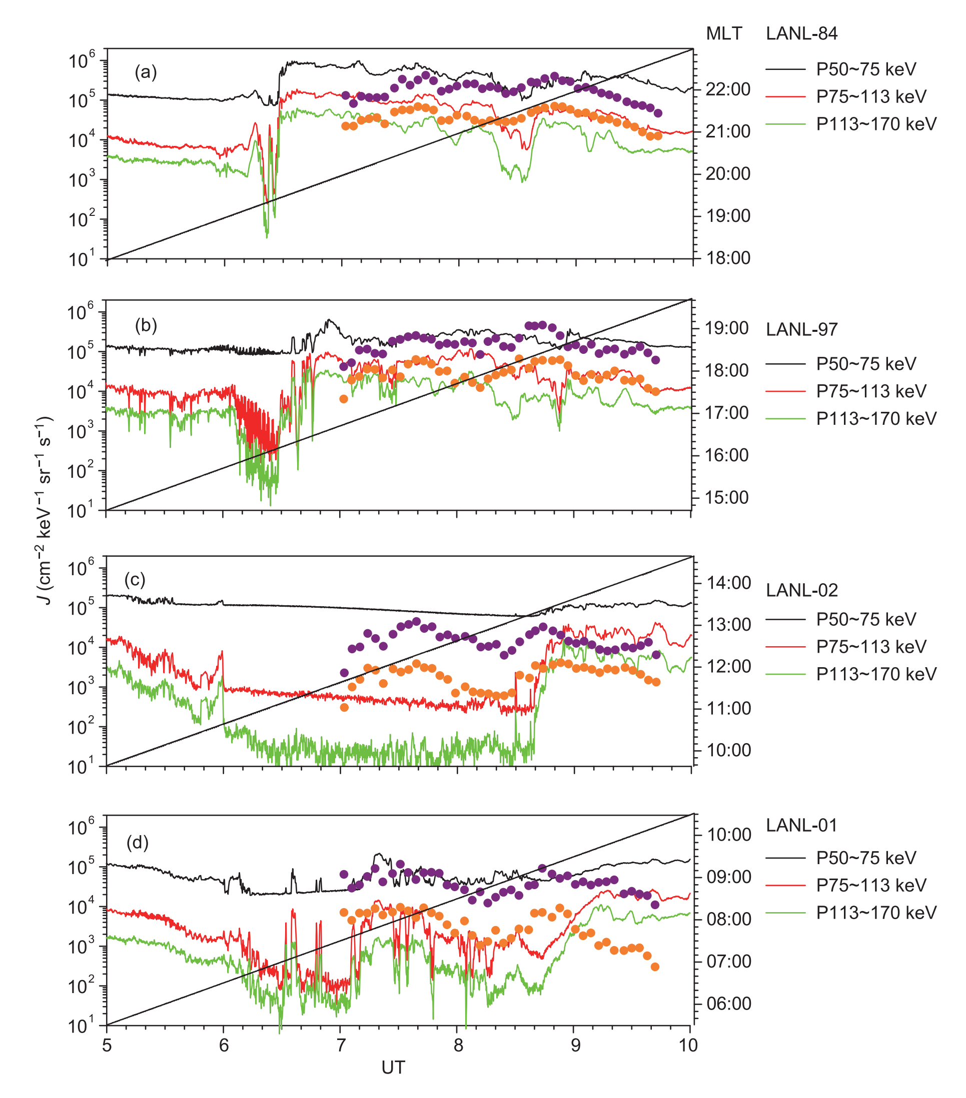


图 6　反演能量离子通量与 LANL-SOPA 原位探测数据的比较

LANL 星簇卫星的磁地方时用图中黑色直线和右边的坐标表示. 紫色圆点表示 50~81 keV 能道的反演结果, 橙色圆点表示 81~158 keV 能道的反演结果

离子通量极大时开始的. 依据AL指数的曲线轮廓, 亚暴的增长相和膨胀相一起(图7中的橙色阴影), 与环电流离子的增长过程(图7中灰色阴影), 经历了差不多相同的时间跨度, 只是比环电流离子增长过程滞后了约12 min.

3.3　环电流在系列亚暴过程中的演化

地球同步卫星GOES-10(位于午夜前, 图8(a))和GOES-12(位于午夜后, 图8(b))上的磁强计的磁场探测数据, 给出了磁场的尾向拉伸(地向磁场增强, 北向磁场减小, 图8中用蓝色箭头表示)和偶极化(地向磁场减小, 北向磁场增强, 图8中用红色箭头表示), 它们在同步高度表征亚暴的增长相和膨胀相(Liu和Rostoker, 1995; Daglis等, 1999)要略早于图7(a)中AL指数所给出的. 看起来, 亚暴的磁场响应时序是从磁尾向内磁层发展变化的. LANL系列卫星上的磁层等离子体分析仪(LANL-MPA)给出了同步高度的等离子体流探测曲线(图9).

亚暴期间磁场的尾向拉伸和偶极化与同步高度离子通量的减少和增加密切相关(Fu等, 2011, 2012a). Walker等(1976)表明在亚暴触发之前通常可以观测到夜侧同步高度能量离子通量减少, 接着当亚暴触发

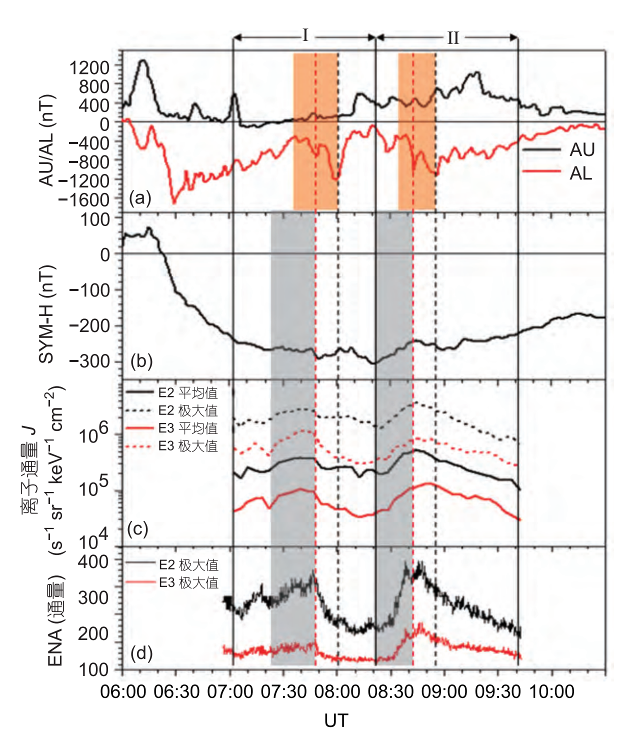


图 7　AU/AL 指数(a)、SYM-H 指数(b)、由中性原子探测图像反演所得赤道离子通量分布的极大值和平均值(c)以及中性原子探测计数的最大值(d)

E2 为 50~81 keV 能道; E3 为 81~158 keV 能道; 三条黑色竖实线把中性原子成像探测的采样时段分成两个子区间 I 和 II; 两条红色竖虚线穿过反演离子通量的峰值; 两条黑色竖虚线则穿过每个子区间 AL 指数极小值, 两个灰色阴影区域, 分别位于磁暴的主相和恢复相, 标注了环电流离子通量的增长时段

时能量离子通量又重新回复. 这种离子通量减少被解释为捕获区(磁场较强的区域, 在该区域内可以将跨越磁力线运动的离子转变成绕磁力线做螺旋运动的离子)外边界向观测卫星所在的赤道方向和地球方向运动所致. Sauvaud和Winckler(1980)进一步解释说这种捕获区外边界向赤道方向和地球方向运动是磁力线尾向拉伸的结果. 亚暴过程中, 磁力线尾向拉伸(图8中蓝色箭头)造成同步高度能量离子通量下降(图9中绿色箭头), 即所谓的亚暴增长相粒子缺失(growth phase dropout)(Sauvaud等, 1996). 磁场偶极化(图8中红色箭头), 伴随着等离子体对流转为地向(图9中红色箭头), 同步高度能量离子通量开始急剧增加(图9中蓝色箭头). 这种同步高度能量离子通量的急剧增加被公认为是环电流的能量离子注入(energetic ions injection)信号(Sergeev等, 1998). 我们把发生在0736和0822 UT两次亚暴对应的各种现象按时间顺序排列在表1和2中. 低高度(L=~4)环电流的离子通量增长比同步高度的离子注入信号要早约10 min左右. 当磁场偶极化时, 磁力线地向运动, 这时等离子体对流也转成了地向.

夜侧L=~4附近环电流中能量离子通量分布在系列亚暴过程中呈现出往复变化. 在缺少磁场原位探测的前提下我们假设同步高度的磁场偶极化以对流速度地向传播(Sergeev等, 1998; Fu等, 2012b). 图10

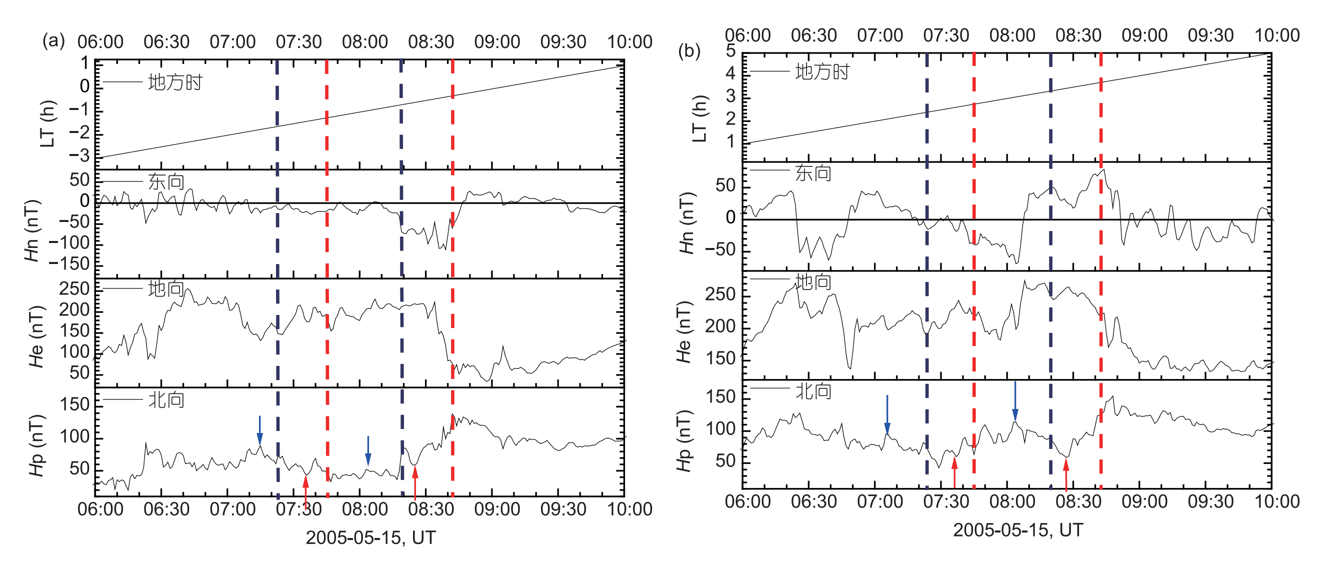


图 8　GOES-10 卫星(a)和 GOES-12 卫星(b)在卫星坐标系下的磁场探测数据

卫星位置的地方时在图的顶部. 蓝色竖虚线表示环电流开始增长的时刻; 红色竖虚线表示环电流开始增长到极大的时刻

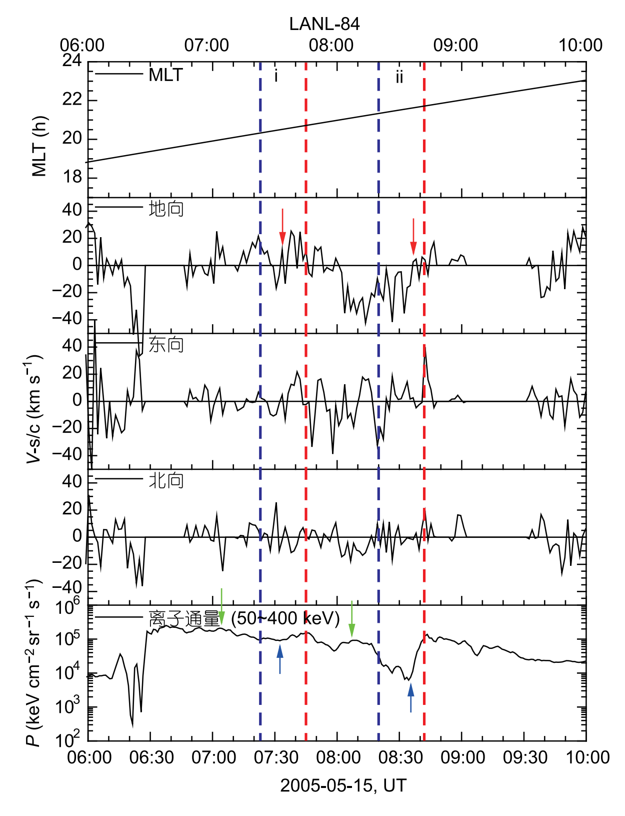


图 9　LANL-84 卫星上磁层等离子体分析仪(MPA)低能道(1~130 eV/e)记录的等离子体流速三分量

卫星坐标系里依次为: 地向、东向和北向. 最上边为磁地方时, 最下边为能量范围在 50~300 keV 的离子通量. 所标注的蓝色和红色竖虚线与图 8 相同

给出系列亚暴过程的描述: (1) 磁场尾向拉伸时, 同步高度观测到的对流是尾向的, 赤道区磁场减小; 由第一绝热不变量守恒, 能量离子的投掷角在磁尾同步高度由垂直磁力线方向向平行磁力线方向扩散(Sauvaud和Winckler, 1980), 并沿磁力线地向运动和横向漂移. 这些能量离子在运行过程中又被内磁层的磁力线捕获, 并反跳到近地环电流区域. 这时我们看到近地环电流区能量离子通量增强. (2) 亚暴触发时磁场偶极化, 能量粒子(energetic particles)被输运回同步轨道区, 同时来自磁尾新的能量粒子向内磁层注入, 以填充捕获区边界外移时对新能量离子成分的需求.

磁场偶极化以后从磁尾注入新的能量离子被内磁层磁力线所捕获, 分布在很大的空间区域里, 并没有直接进入环电流. 我们看到在最后一次离子注入事件(0840 UT, 图9)后的一个小时里, 双星上的中性原子成像仪观测到的环电流区离子通量在持续减弱, 并没有任何增强的迹象. 也就是说, 只有在太阳风驱动的磁层磁力线尾向拉伸时, 才能使磁尾捕获区的能量离子通过绝热扩散, 沿磁力线地向运动到高纬度区域, 又被内磁层近地磁力线再次捕获, 并引起AE指数增加, 进而通过反跳进入近地环电流区域.

4　小结

双星上高时间分辨的中性原子成像仪有幸记录了2005年5月15日的一个强磁暴过程. ENA成像探测反演数据与地球同步轨道上星簇卫星LANL和GOES的原位离子通量和磁场探测数据进行比较, 发现三组数据具有某种相互关联的共变特性.

由Dst指数量度的环电流主要产生于L=4的高能量离子通量区域, 而不是内磁层L<10的广泛空间. 高时间分辨的中性原子成像探测反演数据表明强磁

表 1　0736 UT 亚暴事件的演化时序

UT	卫星/仪器	地方时	观测事件描述	参考图
0703	LANL84/SOPA	20:00	同步高度离子通量(50~400 keV)开始减少	图9
0704	Goes12/M-meter	02:06	磁力线尾向拉伸	图8
0714	Goes10/M-meter	22:04	磁力线尾向拉伸	图8
0722	TC-2/NUADU	全球	环电流离子通量开始增长	图6
0732	LANL84/SOPA	20:31	同步高度离子通量(50~400 keV)开始增长	图9
0733	LANL84/MPA	20:33	对流转为地向	图9
0735	Goes10/M-meter	22:32	磁场偶极化	图8
0737	Goes12/M-meter	02:28	磁场偶极化	图8
0744	TC-2/NUADU	全球	环电流离子通量达到极大, 并开始下降	图6
0800	地面站		极光电激流, AL指数负极值	图7

表 2　0822 UT 亚暴事件的演化时序

UT	卫星/仪器	地方时	观测事件描述	参考图
0803	Goes10/M-meter Goes12/M-meter	23:01 03:03	几乎同时开始磁力线尾向拉伸	图8
0806	LANL84/SOPA	21:06	同步高度离子通量(50~400 keV)开始减少	图9
0820	TC-2/NUADU	全球	环电流离子通量开始增长	图6
0825	Goes10/M-meter	23:36	磁场偶极化a)	图8
0826	Goes12/M-meter	03:27	磁场偶极化	图8
0836	LANL-84/MPA	21:36	对流转为地向	图9
0840	LANL84/SOPA	21:29	同步高度离子通量(50~400 keV) 急剧增长, 即为离子注入信号	图9
0842	TC-2/NUADU	全球	环电流离子通量达到极大, 并开始下降	图6
0855	地面站		极光电激流, AL指数负极值	图7

a) 0818 UT的*H*p增长未伴随有*H*n的减小, 故未被认证为磁场偶极化

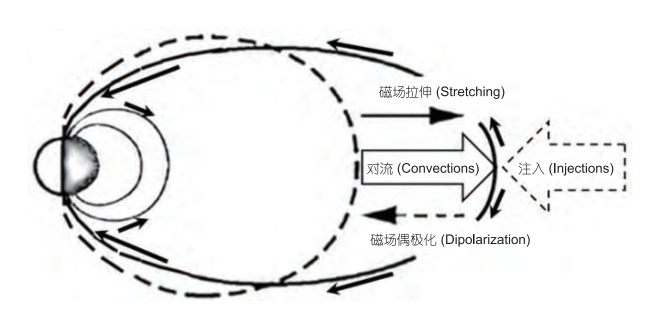


图 10　磁暴时磁场拉伸和偶极化过程的示意图

沿磁力线的黑色小箭头表示磁场拉伸时能量离子扩散路径

暴环电流的演化过程与系列亚暴密切相关. 地球同步轨道夜侧亚暴的磁场响应要先于地面站所记录的地磁指数响应. 环电流区的能量离子通量增长发生在磁力线尾向拉伸的亚暴增长相阶段, 而不是磁场地向偶极化之后. 我们的观测和研究结果挑战了环电流能量粒子是由磁尾直接注入的传统概念. 亚暴增长相阶段在地球同步轨道上观测到的粒子缺失及注入信号也许能解释为捕获区外边界在亚暴期间随着磁力线拉伸和偶极化的运动造成的. 我们的结论还需更多的观测事实加以论证.

致谢　对LANL和GOES卫星团队在网上提供探测数据表示感谢.

参考文献

Belian R D, Gisler G R, Cayton T, et al. 1992. High-Z energetic particles at geostationary orbit during the great solar proton event series of October 1989. J Geophys Res, 97: 16897

C:son Brandt P, Demajistre R, Roelof E C, et al. 2002a. IMAGE/high-energy energetic neutral atom: Global energetic neutral atom imaging of the plasma sheet and ring current during substorms. J Geophys Res, 107: 1454

C:son Brandt P, Ohtani S, Mitchell D G, et al. 2002b. ENA observations of a global substorm growth phase dropout in the nightside magnetosphere. Geophys Res Lett, 29: 1962

Daglis I A, Richard Thorne M, Baumjohann W, et al. 1999. The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay. Rev Geophys, 37: 407–438

Delcourt D C. 2002. Particle acceleration by inductive electric fields in the inner magnetosphere. J Astrophy, 64: 551–559

Echer E, Gonzalez W D, Tsurutani B T. 2008. Interplanetary conditions leading to Superintense geomagnetic storms (Dst <−250 nT) during solar cycle 23. Geophy Res Lett, 35: L06S03

Fu H S, Khotyaintsev Y V, André M, et al. 2011. Fermi and betatron acceleration of suprathermal electrons behind dipolarization fronts. Geophys Res Lett, 38: L16104

Fu H S, Khotyaintsev Y V, Vaivads A, et al. 2012a. Pitch angle distribution of suprathermal electrons behind dipolarization fronts: A statistical overview. J Geophys Res, 117: A12221

Fu H S, Khotyaintsev Y V, Vaivads A, et al. 2012b. Electric structure of Dipolarization front at sub-proton scale. Geophys Res Lett, 39: L06105

Hori T, Lui A T Y, Ohtani S, et al. 2005. Storm-time convection electric field in the near-Earth plasma sheet. J Geophys Res, 110: A04213

Grafe A, Feldstein Y I. 2000. About the relationship between auroral electrojets and ring current. Ann Geophys, 18: 874–886

Kamide Y, Baumjohann W, Daglis I A, et al. 1998. Current understanding of magnetic storms: Storm-substorm relationships. J Geophys Res, 103: 17705–17728

Kozyreva O V, Kleimenova N G. 2007. Geomagnetic pulsations and magnetic disturbances during the initial phase of a strong magnetic storm of May 15, 2005. Geomagn Aeron, 47: 501–511

Lazutin L L, Kuznetsov S N. 2008. Nature of sudden auroral activations at the beginning of magnetic storms. Geomagn Aeron, 48: 165–174

Le G, Russell C T, Takahashi K. 2004. Morphology of the ring current derived from in-situ magnetic field measurements. Ann Geophys, 22: 1267–1295

Liu W W, Rostoker G. 1995. Energetic ring current particles generated by recurring substorm cycles. J Geophys Res, 100: 21897–21910

Liu Z X, Escoupet C P, Pu Z Y, et al. 2005. The Double Star mission. Ann Geophys, 23: 2707–2712

Lu L, McKenna-Lawlor S, Barabash S, et al. 2008. Iterative inversion of global magnetospheric ion distributions using energetic neutral atom (ENA) images recorded by the NUADU/TC2 instrument, Ann Geophy, 26: 1641–1652

Lu L, McKenna-Lawlor S, Barabash S, et al. 2010. Comparisons between ion distributions retrieved from ENA images of the ring current and contemporaneous, multipoint ion measurements recorded in situ during the major magnetic storm of 15 May 2005. J Geophys Res, 115: A12218

McKenna-Lawlor S, Balaz J, Barabash S, et al. 2004. The energetic NeUtral Atom Detector Unit (NUADU) for China's Double Star Mission and its calibration. Nucl Ins Meth A, 503: 311–322

McKenna-Lawlor S, Lu L, Iannis Dandouras, et al. 2010. Moderate geomagnetic storm (21–22 January 2005) triggered by an outstanding coronal mass ejection viewed via energetic neutral atoms. J Geophys Res, 115, doi: 10. 1029/2009 JA014663

Peroomian V, Ashour-Abdalla M. 1996. Population of the near-earth magnetotail from the auroral zone. J Geophys Res, 101: 15387–15401

Sauvaud J A, Winckler J R. 1980. Dynamics of plasma, energetic particles, and fields near synchronous orbit in the nighttime sector during magnetospheric substorms. J Geophys Res, 85: 2043–2056

Sauvaud J A, Beutier T, Delcourt D. 1996. On the origin of flux dropouts near geosynchronous orbit during the growth pahse of substorms, 1, betatron effects. J Geophys Res, 101: 19911–19919

Sergeev V A, Shukhtina M A, Rasinkangas R, et al. 1998. Event study of deep energetic particle injections during substorm. J Geophys Res, 103: 9217–9234

Tsurutani B T, Gonzalez W D. 1997. The interplanetary causes of magnetic storms: A review. In: Tsurutani B T, Gonzalez W D, Kamide Y, Arballo J K, eds. Magnetic Storm. Geophys Monogr Vol. 98. Washington D C: AGU. 77–89

Tverskaya LV, Ginzburg E A, Ivanova T A, et al. 2007. Peculiarities of the outer radiation belt dynamics during the strong magnetic storm of May 15, 2005. Geomagn Aeron, 47: 696–703

Walker R J, Erickson K N, Swznson R L, et al. 1976. Substorm-associated particle boundary motion at synchronous orbit. J Geophys Res, 81: 5541–5550

Wygant J, Rowland D, Singer H J, et al. 1998. Experimental evidence on the role of the large spatial scale electric field in creating the ring current. J Geophys Res, 103: 29527–29544

Xie L, Pu Z Y, Zhou X Z, et al. 2006. Energetic ion injection and formation of the storm-time symmetric ring current. Ann Geophys, 24: 3547–3556